

## КОМПЛЕКСНАЯ СХЕМА ПЕРЕРАБОТКИ РАСТВОРНОЙ И ОСАДОЧНОЙ ЧАСТЕЙ НАКОПЛЕННЫХ ВАО СЛОЖНОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА РАДИОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА ФГУП «ПО «МАЯК»

П. В. Козлов, С. М. Шайдуллин, Д. В. Маркова, М. В. Логунов,  
М. Б. Ремизов, С. А. Лукин, Е. Н. Зубриловский

ФГУП «ПО «Маяк», Озерск, Челябинская область

Статья поступила в редакцию 21 сентября 2024 г.

*Представлена комплексная многовариантная схема переработки накопленных ВАО сложного химического состава с описанием заложенных в нее технологических процессов, характеристик образующихся на каждом переделе продуктов и взаимосвязи ее отдельных элементов между собой. Указано предполагаемое к внедрению в составе схемы технологическое оборудование (либо его прототипы). Приведены граничные значения предварительной технико-экономической оценки вариантов переработки растворной и осадочной частей накопленных ВАО. Показана целесообразность продолжения работ по выбору оптимальных вариантов реализации технологической схемы.*

**Ключевые слова:** емкости-хранилища, высокоактивные отходы, осадки, микрофильтрация, нейтрализация, сорбция, экстракция, цементирование, остекловывание, электропечь, ИПХТ, радиоактивные отходы.

В емкостях-хранилищах ФГУП «ПО «Маяк» хранится около 14 тыс. м<sup>3</sup> щелочных высокоактивных пульп, полученных в результате применения осадительных технологий при переработке облученного топлива ядерных реакторов. До настоящего времени задача переработки и кондиционирования накопленных высокоактивных отходов (НВАО) остается нерешенной.

История формирования данной группы отходов и эволюции их физико-химического состояния подробно описана в работах [1], [2]. В настоящее время они представляют собой преимущественно щелочные системы из осадков и осветленных растворов с преобладанием растворной части. Основу осадков составляют

соединения алюминия, железа, никеля, хрома, марганца, кремния. Жидкая фаза представляет собой высокоминерализованные растворы, химический состав которых обусловлен преимущественно нитратом, гидроксидом, алюминатом и нитритом натрия. Состав и активность растворной части НВАО зависит от уровня надосадком. В глубинных слоях осветленной фазы возрастает суммарная бета-активность, вклад в нее пары <sup>90</sup>Sr + <sup>90</sup>Y, а также концентрация основных макрокомпонентов жидких радиоактивных отходов (ЖРО).

Радионуклидный состав НВАО представлен осколочными продуктами и актинидами, содержание которых в осадке значительно (в

десять-сотни раз) выше, чем в осветленной фазе. Активность осадка обусловлена радионуклидами цезия, стронция, плутония и америция. Активность растворной части на 99,9% определяется радионуклидом  $^{137}\text{Cs}$ .

Сложность переработки и кондиционирования данной группы отходов обусловлена двумя факторами: отсутствием штатной системы размыва плотного слоя осадка и сложностью его химического состава, существенно отличающегося для разных емкостей. Данные по составу осадков крайне отрывочны и разнородны, при этом трудности аналитического определения состава обусловлены сложностью осуществления представительного пробоотбора и высокого уровня активности материала, что приводит к большим погрешностям определения. На начальном этапе подбора технологических решений была проведена оценка химического состава хранящихся пульп расчетным методом на основании архивных данных по химическому составу и объемам размещавшихся в емкостях отходов. Результаты расчета элементного состава пульп, поступивших в емкости на хранение, представлены на рис. 1 [1].

Специалистами ФГУП «ПО «Маяк» в 2021–2022 гг. разработана комплексная многовариантная схема извлечения и переработки растворной и осадочной частей отходов [2] (рис. 2).

Указанная схема (как отдельные элементы, так и их взаимосвязь) прорабатывалась в рамках выполнения в 2022–2024 гг. заключенного между Госкорпорацией «Росатом» и ФГУП «ПО «Маяк» государственного контракта от 04.04.2022 № Н.4д.241.20.22.1057 «Разработка и обоснование вариантов переработки высокоактивных отходов сложного химического состава, включая опытно-конструкторские работы и опытно-промышленные испытания оборудования». По

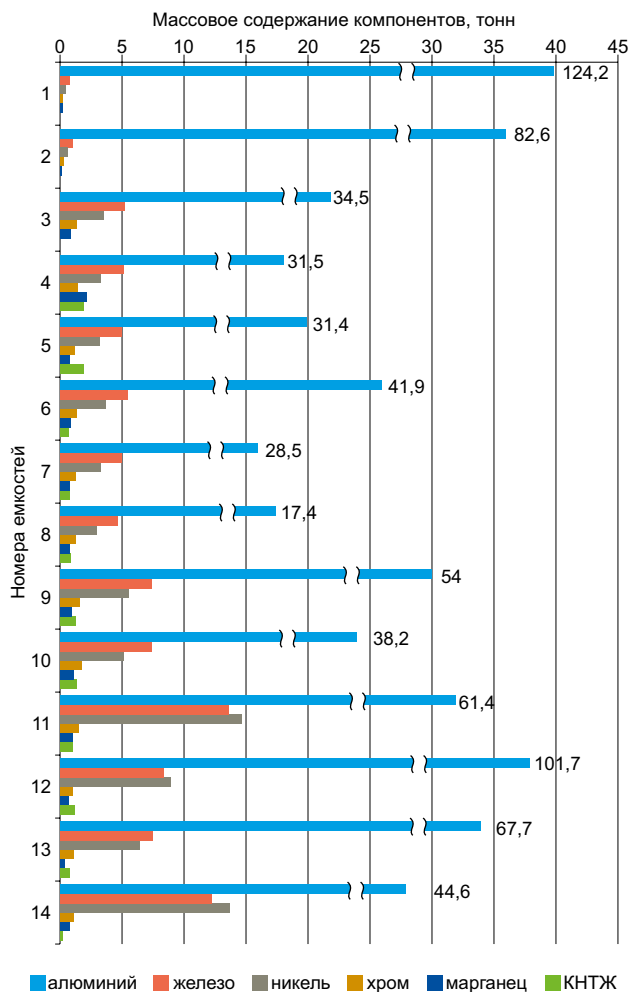


Рис. 1. Массовое содержание основных элементов и компонентов (кроме натрия) в емкостях-хранилищах (КНТЖ – катионит неорганический титано-железистый)

результатам исследований будут определены наиболее перспективные варианты для дальнейшей реализации.

На начальном этапе были сформированы четыре варианта переработки растворной части отходов (рис. 3–6). Общим этапом для всех

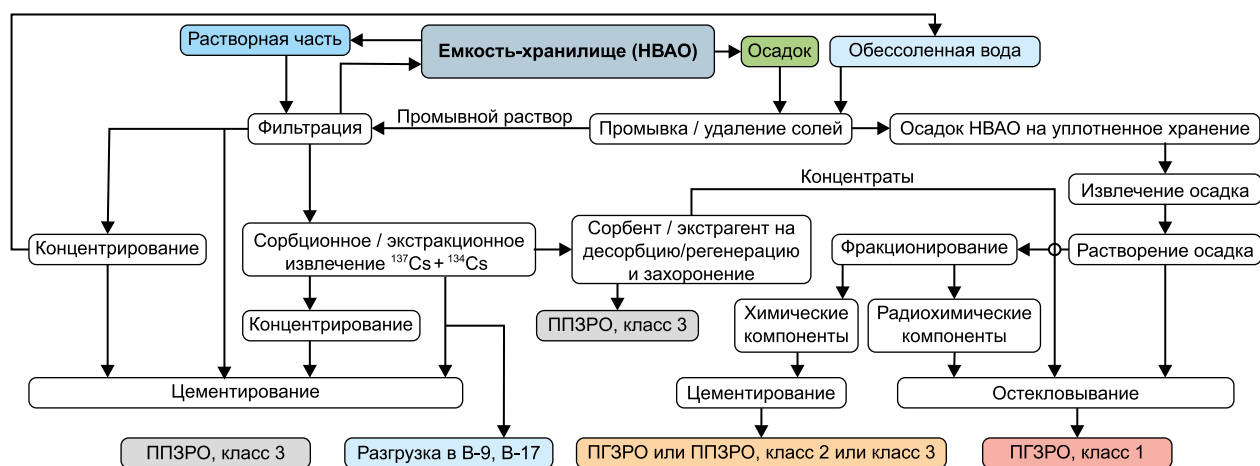


Рис. 2. Комплексная схема переработки НВАО с разделением потоков

вариантов является предварительное удаление из раствора альфа-излучающих радионуклидов, ассоциированных на взвесах и коллоидах, на тангенциальных модулях с керамическими фильтрами. Данное действие позволяет снизить уровень альфа-активности раствора до возможности отнесения итогового компаунда к 3 классу радиоактивных отходов (РАО) по [3], [4], причем не только в случае переработки хорошо отстоявшихся верхних слоев ЖРО с минимальным содержанием взвесей, но и при обращении с подвижным слоем легкозвучиваемой суспензии, разделяющим осветленный раствор и плотный осадок. Удаленные из раствора при фильтрации взвеси в виде концентрированной пульпы направляются на переработку совместно с плотным осадком. Фильтрация растворов может быть осуществлена на установке, аналогичной разработанной ООО НПФ «Сосны» для выделения альфа-излучающих нуклидов на Комплексе цементированья жидких среднеактивных РАО (САО) радиохимического производства ФГУП «ПО «Маяк».



Рис. 3. Схема переработки растворной части отходов по варианту №1

Вариант №1 включает в себя отверждение отфильтрованной растворной части НВАО методом цементированья напрямую, без какой-либо дополнительной подготовки (рис. 3). Кондиционирование проводится с использованием шлакощелочных цементов, обеспечивающих получение компаундов требуемого качества при отверждении солевых растворов с высокой концентрацией свободной щелочи [5]–[7]. Цементированье может осуществляться как с использованием установки, разработанной ООО НПФ «Сосны», в которой для приготовления твердеющей смеси используется вкладыш в контейнер НЗК-150-1,5П или КЗХ-2кС-01 с перемешивающим устройством, работающим по принципу «потерянной мешалки» (базовый вариант), так и в смесителях комплекса цементированья САО радиохимического производства с размещением компаунда внутри отсеков в пластиковой ячеистой многоярусной системе хранения.

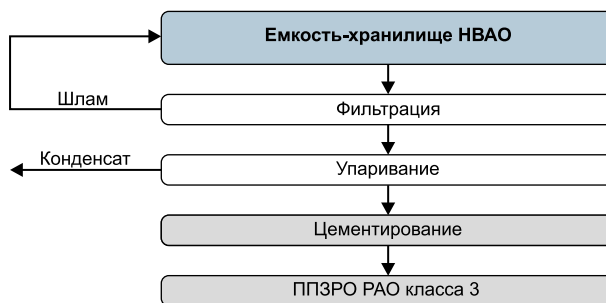


Рис. 4. Схема переработки растворной части отходов по варианту №2

Вариант №2 предусматривает проведение перед цементированьем стадии упаривания для уменьшения объема отходов (рис. 4). Его кратность составляет около двух, что обусловлено достижением практически предельной концентрации растворенных соединений в осветленной части 650–700 г/дм<sup>3</sup>, соответствующей степени включения солевых компонентов в цементный компаунд около 23% по массе [7]. Реализация данного процесса возможна в испарителе прямоточного типа.

Концентрирование ЖРО по варианту №2 позволяет снизить объем образующихся кондиционированных РАО класса 3 в соответствии с кратностью упаривания примерно в два раза. Образующийся при упаривании конденсат может быть использован при распульповке и промывке осадочной части НВАО.

Вариант №3 представляет собой экономичный сценарий переработки. Схема предусматривает проведение сорбционного или экстракционного выделения радионуклидов цезия из предварительно отфильтрованной растворной части и последующее размещение очищенных жидкостей в один из промышленных водоемов ФГУП «ПО «Маяк» (В-9 или В-17) (рис. 5). В данном варианте предварительная фильтрация служит не только для удаления большей части альфа-содержащих радионуклидов, ассоциированных на взвесах и коллоидах, но и в первую очередь для обеспечения стабильности гидродинамических режимов сорбционной либо экстракционной очистки.

Среди потенциальных негативных факторов варианта №3 – неопределенность в поведении химических компонентов отходов (например, коагуляция пор либо десорбирующее воздействие на уже локализованные в породах радионуклиды) при размещении в специальном промышленном водоеме (СПВ).

Для оценки возможности безопасной реализации подобного варианта в 2023–2024 гг. проводятся работы специалистами ФГБУ «Гидроспецгеология» и ФГУП «ПО «Маяк» по

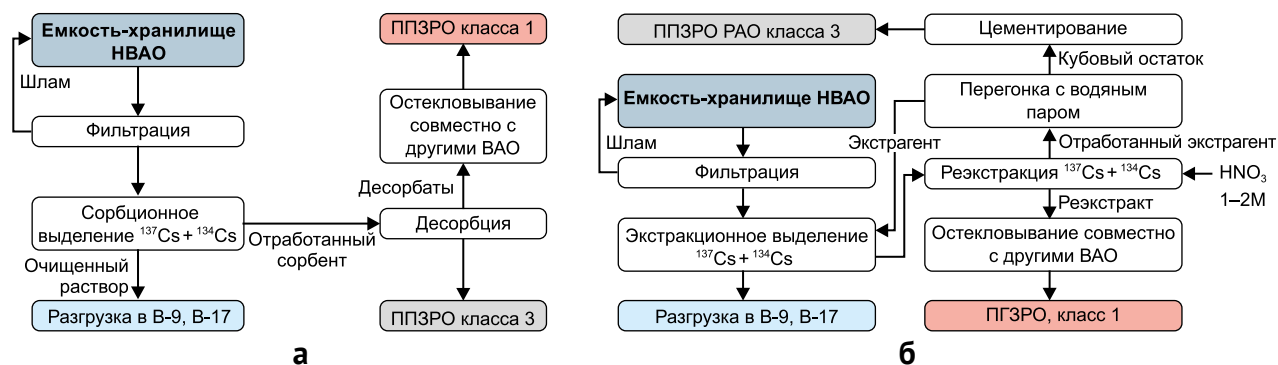


Рис. 5. Схемы переработки растворной части отходов по варианту № 3: а) сорбционный, б) экстракционный

расчетно-экспериментальному моделированию размещения растворной части ЖРО в указанных водоемах. В их состав входят:

1. Создание модели источника загрязнения подземных вод и обоснование объема допустимых сбросов на основании расчетно-экспериментальных исследований водно-химического состояния водоемов В-17 и В-9.

2. Экспериментальное изучение водопроводящих свойств геологического массива на возможных участках разгрузки грунтовых вод.

3. Актуализация модели водоема В-17 и региональной модели водоема В-9, выполнение прогнозных расчетов по распространению загрязняющих веществ с подземными водами от каждого из них.

Сорбционная очистка может быть реализована с применением селективных к цезию в сильнощелочных средах резорцинформальдегидных смол либо ферроцианидного сорбента Ферсал [8], [9]. В первом случае допускается исполнение процесса в режиме динамической сорбции на колоннах, во втором — как в динамической, так и в статической. Наблюдаемый в исследованиях коэффициент очистки раствора от цезия составляет от двух до четырех порядков.

Объем отработанного сорбента составит примерно 1% от объема очищенных ЖРО. После его однократного или многократного использования проводится окончательная десорбция цезия с целью снижения категории РАО до 3 класса, а также уменьшения радиационной и термической нагрузки на материал сорбента. Для удобства обращения с сорбционным блоком он может быть выполнен в виде модуля, размещаемого в контейнере типа НЗК, с заполнением внутренних пустот бентонитовой глиной, который после десорбции опорожняется вакуумированием, отключается от линий подсоединения, герметизируется и удаляется на хранение/захоронение. При этом, безусловно, произойдет некоторое увеличение объема упакованного сорбента за счет контейнеризации. Возможно и

классическое использование сорбционных колонн с выгрузкой сорбента из них по окончании срока службы и последующим включением в цементный компаунд совместно с очищенным раствором. Десорбаты, регенераты, промывные растворы, содержащие из макрокомпонентов преимущественно только азотную кислоту, а из радионуклидов — практически только радионуклиды цезия, присоединяются к другим потокам остекловываемых ВАО фактически без увеличения объема конечного продукта.

Экстракционное выделение цезия, альтернативное сорбционному, производится с использованием смеси на основе пара-изононилкаликс[6]арена (ИН6) [10]. Наблюдаемый в исследованиях коэффициент очистки раствора от цезия составляет около двух порядков. В качестве оборудования для этого процесса предлагается рассмотреть центробежные экстракторы. Для отработки элементов конструкции и технологических режимов ООО «НПФ «Сосны» в 2022—2023 гг. разработало конструкцию и изготовило двухступенчатую макетную установку, которая будет испытана специалистами ФГУП «ПО «Маяк» в конце 2024 г.

Обращение с реэкстрактами аналогично описанному ранее подходу с десорбатами и регенератами. Для утилизации отработанной органики предлагается рассматривать метод перегонки с водяным паром и последующим отверждением кубового остатка методами цементирования либо остекловывания. Данный подход в целом соответствует предполагаемому на предприятии для других потоков отработанного экстрагента.

Вариант № 4 является совмещением схем № 2 и № 3 и включает сорбционное или экстракционное выделение радионуклидов цезия из растворной части с последующим упариванием и цементированием очищенных растворов (рис. 6). Данный сценарий по сравнению с остальными не имеет технико-экономических преимуществ, но является наиболее экологичным и в полной

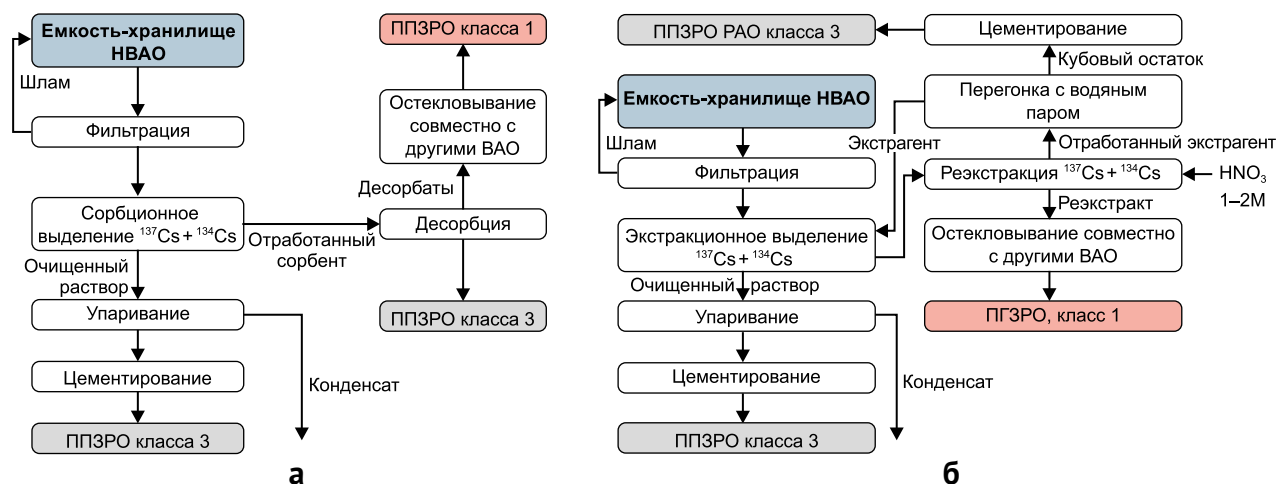


Рис. 6. Схемы переработки растворной части отходов по варианту № 4: а) сорбционный, б) экстракционный

мере соответствует нормативным требованиям по безопасному обращению с РАО.

Выбор способа переработки НВАО можно сделать по результатам технико-экономической оценки вариантов с учетом общественно-политических факторов.

Для переработки осадочной части рассматриваются следующие подходы.

На сегодняшний момент в проекте нового комплекса остекловывания ФГУП «ПО «Маяк» принят способ извлечения осадочной части, основанный на использовании пульпоподъемных устройств разработки ООО «НПФ «Сосны» (в 2022 г. был изготовлен и успешно опробован на имитационных системах опытный образец). Отбор суспензии производится через имеющиеся технологические отверстия небольшого диаметра, расположенные в разных точках перекрытия емкости. Подобный подход без каких-либо затруднений позволит извлечь из емкостей подвижную часть осадка. Для удаления его уплотненной части потребуются проведение промывки путем подачи промывной жидкости, которая за счет химического и гидродинамического факторов воздействия пептизирует глиноподобный осадочный материал, обеспечивая возможность его транспортирования по коммуникациям. Наиболее подходящим на данный момент вариантом промывной жидкости представляется вода (обессоленный конденсат), которая, как показали эксперименты на реальном осадке, эффективно удаляет растворимые компоненты из него. Осадок может быть отмыт в значительной степени как от растворимых химических макрокомпонентов, например солей натрия, так и от ряда радионуклидов (цезия и др.).

После такой обработки осадок теряет значительную долю тепловыделяющих радионуклидов, поэтому возможна реализация его сбора

из нескольких емкостей и временного хранения в так называемом уплотненном режиме до момента подачи на стадию переработки и остекловывания.

Таким образом, использование при обращении с плотными осадками процесса промывки позволяет решить три задачи:

- обеспечить их подвижность, а значит, и извлечение из емкости-хранилища;
- сократить количество растворимых макрокомпонентов в них, что потенциально может привести к снижению объема остеклованных ВАО;
- уменьшить активность и тепловыделение осадка, что позволит осуществить его временное хранение в более компактном объеме уплотненно, до появления необходимых мощностей по остекловыванию (строительства высокопроизводительных печей).

За счет подобного подхода даже до появления печей с необходимой производительностью появляется возможность высвободить несколько емкостей-хранилищ и использовать их в качестве резервных на случай протечек заполненных.

На случай отсутствия возможности полного удаления всего осадка из самых труднодоступных зон емкостей (с разумными эксплуатационными и временными затратами) в 2024–2025 гг. в рамках договора с Госкорпорацией «Росатом» специалистами ФГУП «ПО «Маяк» и ИБРАЭ РАН прорабатывается расчетное обоснование вариантов захоронения осадочной части ВАО сложного химического состава по месту расположения в емкостях-хранилищах с приданием объекту статуса пункта размещения особых РАО.

Образующиеся после промывки промыводы фильтруют для исключения захвата осадков с долгоживущими альфа-излучающими нуклидами. После этого их перерабатывают по одному из четырех вариантов обращения с растворной

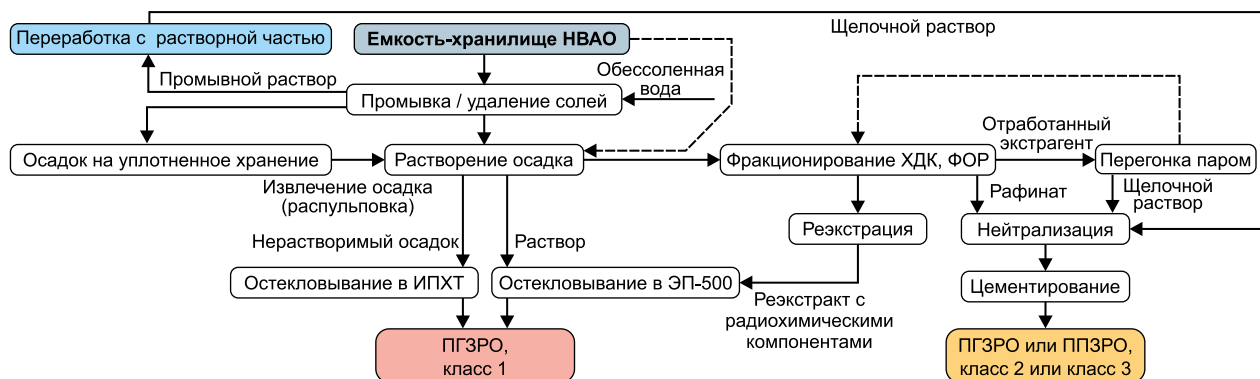


Рис. 7. Схема переработки осадочной части отходов

частью НВАО. Обоснованность необходимости рассмотрения варианта с промывкой подтверждается применением схожего подхода специалистами завода WTP в Хэнфорде при утилизации осадочной части отходов.

Что касается дальнейшего обращения с осадком, содержащим, в частности, долгоживущие радионуклиды, то тут возможны три варианта переработки (рис. 7):

1) базовый вариант предполагает их растворение (азотной кислотой или смесями кислот) и остекловывание в печах прямого электрического нагрева (создаваемой в настоящее время ЭП-250/6, а также ЭП/7 и ЭП/8 проектируемого Нового комплекса остекловывания),

2) остекловывание суспензии промытого осадка в индукционной печи типа «холодный» тигель (ИПХТ). В качестве объекта для остекловывания подобным образом можно также рассматривать нерастворенные остатки со стадии их растворения. Конструкция ИПХТ предоставляет возможность подавать в него весьма концентрированные суспензии, в отличие от печей типа ЭП, но ИПХТ, в свою очередь, обладает кратно меньшей производительностью, что не позволяет использовать его в качестве основной установки для остекловывания осадков НВАО напрямую,

3) альтернативный вариант предполагает кислотное растворение осадка с последующим фракционированием радионуклидов экстракционными методами с применением в качестве экстрагентов, например, фосфинооксида разнорадикального и хлорированного дикарболлида кобальта. Выделенные таким образом радионуклиды (в первую очередь трансурановые элементы, цезий и стронций) остекловываются с получением РАО 1 класса, а очищенный азотнокислый раствор, содержащий основную часть химических компонентов, цементируется. Поскольку цементировать можно только нейтральный либо щелочной раствор,

необходима его обработка реагентом, в качестве которого можно использовать очищенные щелочные декантаты и жидкость от промывки осадков НВАО. В зависимости от достигнутых на данных операциях коэффициентов очистки отвержденный раствор будет относиться к РАО 2 либо 3 класса.

Таблица 1. Регламентные ограничения по содержанию компонентов в ОВАО, % мас

Компонент	Содержание
$Al_2O_3$	14 ÷ 18
$Al_2O_3 + Me_2O_x$	19 ÷ 23
$Na_2O + Me_2O$	22 ÷ 26
$P_2O_5$	49 ÷ 55
$B_2O_3$	6,0
$Fe_2O_3$	1,6
$Cr_2O_3$	0,4
$NiO$	0,3
$CaO$	1,0
$MgO$	2,5
$MnO_2$	0,09
$SO_3$	0,42
$U_3O_8$	5,0
$PuO_2$	0,034
$MoO_3$	1,8

Первый и второй варианты подразумевают образование большого количества ОВАО 1 класса в случае соответствия стеклоподобного компаунда существующим нормам технологического регламента цеха остекловывания по содержанию компонентов отходов (табл. 1). Указанные ограничения обусловлены соответствием образующихся ОВАО требованиям НП-019-2015 [11] к стеклоподобному компаунду, а также обеспечивают приемлемые эксплуатационные показатели установки

остекловывания в части сохранения необходимых термовязкозиметрических свойств расплава для осуществления его контролируемого слива в бидоны и допустимую коррозионную активность по отношению к огнеупорным и электродным материалам. Ряд экспериментальных работ, проведенных в направлении повышения указанных концентрационных пределов включения компонентов отходов в стекло, дали обнадеживающие результаты [12]–[14], однако решение поставленной задачи требует проведения системных исследований.

Третий вариант может существенно снизить объем образующихся остеклованных ВАО (РАО 1 класса), что позволит радикально уменьшить требуемую производительность электропечи под задачи переработки НВАО. Предварительное изучение возможности реализации данного варианта специалистами ФГУП «ПО «Маяк» на модельных системах свидетельствует о возможности удаления из растворенного осадка трансурановых элементов с коэффициентом очистки, превышающим два порядка.

### Заключение

Выбор того или иного варианта обращения с растворной и осадочной частями НВАО будет определяться в значительной степени результатами технико-экономической оценки. На начальном этапе была проведена предварительная технико-экономическая оценка наиболее проработанных из предложенных вариантов реализации схемы. При этом определяющее значение в указанных оценках имели отчисления НО РАО на захоронение кондиционированных РАО соответствующих классов, а также стоимость расходных материалов (сорбентов, экстрагентов, сухой смеси, контейнеров и т. д.).

Затраты на переработку всего объема растворной части НВАО в зависимости от варианта исполнения можно оценить от 0,6 до 12,7 млрд руб. Столь значительная разница свидетельствует о целесообразности выбора оптимального варианта.

Стоимость переработки всего объема осадочной части НВАО составляет около 50,6 млрд руб. (по базовому варианту, в соответствии с существующими в технологическом регламенте электропечи остекловывания нормами содержания компонентов в ОВАО). Оценку других вариантов на сегодняшний день провести сложно, так как отсутствует достаточное количество экспериментальных данных как в части исходных характеристик осадочной части, так и по образующимся потокам вторичных ЖРО. Однако

столь высокая стоимость базового варианта также свидетельствует о необходимости выбора оптимального решения, в том числе и по уровню затрат на выполнение работ.

Материал подготовлен в рамках договора от 04.04.2022 № Н.4д.241.20.22.1057 на выполнение государственного контракта «Разработка и обоснование вариантов переработки высокоактивных отходов сложного химического состава, включая опытно-конструкторские работы и опытно-промышленные испытания оборудования».

### Литература

1. *Логунов М. В., Карпов В. А., Тананаев И. Г.* Стабилизация теплофизического состояния и обследование некоторых емкостей-хранилищ высокоактивных пульп на ФГУП «ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 2011. № 4 (64). С. 18–27.
2. *Козлов П. В., Логунов М. В., Ремизов М. Б. и др.* Ретроспективный анализ разработки технологической переработки «накопленных» ВАО радиохимического производства ФГУП «ПО «Маяк» // Радиоактивные отходы. 2023. № 3 (24). С. 14–33. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-14-33.
3. Постановление Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069 «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов» (в ред. постановления Правительства Российской Федерации от 04.02.2015 № 95).
4. О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 19.10.2012 № 1069 : постановление Правительства Российской Федерации от 29.10.2022 № 1929.
5. *Парутин К. А., Шайдуллин С. М., Ремизова В. А., Козлов П. В.* Разработка состава цементной матрицы для иммобилизации щелочных высокоактивных отходов радиохимического производства // Цемент и его применение. 2023. № 3. С. 65–71.
6. *Маркова Д. В., Бобров П. А., Козлов П. В.* Цементирование высокоактивных отходов в шлакощелочные матрицы // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2023. № 3 (119). С. 83–94.
7. *Козлов П. В., Шайдуллин С. М., Ахтямов Р. Я. и др.* Исследование перспективных составов сухой смеси для цементирования растворной части

- накопленных щелочных высокоактивных отходов // Вопросы радиационной безопасности. 2023. № 4. С. 28—40.
8. Milyutin V., Nekrasova N., Kozlov P., Slobodyuk A., Markova D., Shaidullin S., Feoktistov K., Tokar E., Tutov M., Egorin A. Removal of Cs-137 from Liquid Alkaline High-Level Radwaste Simulated Solution by Sorbents of Various Classes // Sustainability. 2023. Vol. 15. P. 8734.
9. Милютин В. В., Некрасова Н. А., Козлов П. В., Маркова Д. В. Сорбция цезия из сильнощелочных растворов на модифицированном ферроцианидном сорбенте «Ферсал» // Радиохимия. 2023. Т. 65. № 4. С. 329—336.
10. Yumaguen A. Z., Babitova E. S., Logunov M. V., Karavan M. D., Kozlov P. V., Konnikov A. V., Smirnov I. V. Dynamic Tests of Cesium-137 Recovery from the Mayak Model Alkaline HLW with p-Isononylcalix[6] arene-based Extractant // Radiochemistry. 2024. Vol. 66. No. 2. Pp. 163—177. DOI: 10.1134/S106636222402005X.
11. НП-019-2015. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности. Утв. Приказом Ростехнадзора от 27.07.2015 № 242.
12. Орлова В. А., Козлов П. В., Джewelло К. А. и др. Фазаобразование в сложных системах фосфатных и борофосфатных стекол, содержащих железо, хром, никель и серу // Неорганические материалы. 2019. Т. 55. № 8. С. 890—897. DOI: 10.1134/S0002337X19080116.
13. Ремизов М. Б., Казадаев А. А., Козлов П. В. и др. Коррозионные испытания плавнелитых огнеупорных материалов в расплавах алюмофосфатных стекол // Огнеупоры и техническая керамика. 2015. № 6. С. 3—8.
14. Ремизов М. Б., Козлов П. В., Казадаев А. А. и др. Коррозионные испытания бадделитокоорундовых и хромсодержащих огнеупорных материалов в расплавах алюмофосфатных стекол // Вопросы радиационной безопасности. 2017. № 3 (87). С. 3—12.

## Информация об авторах

Козлов Павел Васильевич, кандидат технических наук, доцент, начальник исследовательской лаборатории по обращению и кондиционированию РАО Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: kozlov\_pavel@inbox.ru.

Шайдуллин Сергей Минулович, ведущий инженер-технолог лаборатории по обращению и кондиционированию РАО Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: shaidullinsergey@gmail.com.

Маркова Дарья Владимировна, инженер-технолог, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: cpl@po-mayak.ru, e-mail: dvmarkova@mail.ru.

Логунов Михаил Васильевич, кандидат технических наук, советник генерального директора, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: mvlogunov@pomayak.ru.

Ремизов Михаил Борисович, кандидат технических наук, ведущий инженер-технолог Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456780, Челябинская обл., Озерск, ул. Ермолаева, д. 18), e-mail: mirem@yandex.ru.

Лукин Сергей Александрович, исполняющий обязанности начальника Центральной заводской лаборатории, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: lukin235@yandex.ru.

Зубриловский Евгений Николаевич, заместитель директора радиохимического завода по обращению с РАО — начальник участка цементирования жидких и гетерогенных САО, ФГУП «ПО «Маяк» (456784, Челябинская обл., Озерск, пр-кт Ленина, д. 31), e-mail: zubrilov2007@yandex.ru.

## Библиографическое описание статьи

Козлов П. В., Шайдуллин С. М., Маркова Д. В., Логунов М. В., Ремизов М. Б., Лукин С. А., Зубриловский Е. Н. Комплексная схема переработки растворной и осадочной частей накопленных ВАО сложного химического состава радиохимического производства ФГУП «ПО «Маяк» // Радиоактивные отходы. 2024. № 4 (29). С. 6—15. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-4-6-15.



COMPREHENSIVE FLOWCHART PROPOSED TO PROCESS THE SOLUTION  
AND THE SEDIMENT PARTS OF THE ACCUMULATED HLW INVENTORY  
OF COMPLEX CHEMICAL COMPOSITION FROM PA MAYAK'S RADIOCHEMICAL  
PRODUCTION FACILITIES

Kozlov P. V., Shaidullin S. M., Markova D. V., Loginov M. V.,  
Remizov M. B., Lukin S. A., Zubrilovsky E. N.

FSUE "PA "Mayak", Ozersk, Chelyabinsk region, Russia

Article received on September 21, 2024

The paper presents a comprehensive multi-option flowchart proposed to process the accumulated HLW inventories of complex chemical composition describing the core processes, the characteristics of products formed at each processing stage and the relationship between the individual elements of the proposed flowchart. It specifies the process equipment (or its prototypes) to be introduced under the proposed flowchart. It presents the thresholds for the preliminary feasibility assessment of the processing options proposed for the solution and the sedimentary parts of the accumulated HLW inventories. The study demonstrates the feasibility of further efforts seeking to select optimal design options under the proposed flowchart.

**Keywords:** storage tanks, high-level waste, sediment, microfiltration, neutralization, sorption, extraction, cementation, vitrification, electric furnace, induction heating unit for cold crucible melting, radioactive waste.

## References

1. Logunov M. V., Karpov V. A., Tananaev I. G. Stabilizatsiya teplofizicheskogo sostoyaniya i obsledovaniye nekotorykh yemkostey-khranilishch vysokoaktivnykh pul'p na FGUP «PO "Mayak" [Thermophysical stabilization and inspection of certain storage tanks for high-level pulps at FSUE PA Mayak]. *Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation safety issues*, 2011, no. 4 (64), pp. 18–27.
2. Kozlov P. V., Logunov M. V., Remizov M. B., Shaidullin S. M., Lukin S. A., Zubrilovsky E. N. Retrospective Analysis of Advancements in the Processing of Accumulated HLW Generated by PA Mayak's Radiochemical Production Facilities. *Radioaktivnye otkhody — Radioactive Waste*, 2023, no. 3 (24), pp.14–33. DOI: 10.25283/2587-9707-2023-3-14-33.
3. *Postanovleniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 19.10.2012 No. 1069 "O kriteriyakh otneseniya tverdykh, zhidkikh i gazoobraznykh otkhodov k radioaktivnym otkhodam, kriteriyakh otneseniya radioaktivnykh otkhodov k osobym radioaktivnym otkhodam i k udalyayemym radioaktivnym otkhodam i kriteriyakh klassifikatsii udalyayemykh radioaktivnykh otkhodov"* [Decree of the Government of the Russian Federation of October 19, 2012 No. 1069 On criteria used to categorize solid, liquid and gaseous waste as radioactive waste, the criteria for radioactive waste categorization as non-removable radioactive waste or removable radioactive waste, and classification criteria for removable radioactive waste] (as amended by the Decree of the Government of the Russian Federation of February 4, 2015 No. 95).
4. On amendments to the Decree of the Government of the Russian Federation of October 19, 2012 No. 1069 : Decree of the Government of the Russian Federation of October 29, 2022 No. 1929.
5. Parutin K. A., Shaidullin S. M., Remizova V. A., Kozlov P. V. Razrabotka sostava tsementnoy matritsy dlya immobilizatsii shchelochnykh vysokoaktivnykh otkhodov radiokhimicheskogo proizvodstva [Development of cement matrix composition for immobilization of alkaline high-activity waste from radiochemical production]. *Tsement i yego primeneniye — Cement and its applications*, 2023, no. 2, pp. 65–71.
6. Markova D. V., Bobrov P. A., Kozlov P. V. Tsementirovaniye vysokoaktivnykh otkhodov v shlakoshchelochnyye matritsy [Solidification of high-level waste in alkali-activated blast furnace slag cement]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Materialovedenie i novye materialy — Issues of atomic science and technology. Series: Materials Science and New Materials*, 2023, no. 3 (119), pp. 83–94.
7. Kozlov P. V., Shaidullin S. M., Akhtyamova R. Ya. et al. Issledovaniye perspektivnykh sostavov sukhoy smesi dlya tsementirovaniya rastvornoy chasti nakoplennykh shchelochnykh vysokoaktivnykh otkhodov [Study of promising dry mix compositions developed to cement the solution part of accumulated alkaline high-level waste]. *Voprosy radiatsionnoy*

- bezopasnosti — Radiation safety issues*, 2023, no. 4, pp. 28–40.
8. Milyutin V., Nekrasova N., Kozlov P., Slobodyuk A., Markova D., Shaidullin S., Feoktistov K., Tokar E., Tutov M., Egorin A. Removal of Cs-137 from Liquid Alkaline High-Level Radwaste Simulated Solution by Sorbents of Various Classes. *Sustainability*, 2023, vol. 15, p. 8734.
9. Milyutin V. V., Nekrasova N. A., Kozlov P. V., Markova D. V. Sorbtsiya tseziya iz sil'noshchelochnykh rastvorov na modifitsirovannom ferrotsianidnom sorbente "Fersal" [Sorption of cesium from strongly alkaline solutions on the modified ferrocyanide sorbent "Fersal"]. *Radiokhimiya — Radiochemistry*, 2023, vol. 65, no. 4, pp. 329–336.
10. Yumaguen A. Z., Babitova E. S., Logunov M. V., Karavan M. D., Kozlov P. V., Konnikov A. V., Smirnov I. V. Dynamic Tests of Cesium-137 Recovery from the Mayak Model Alkaline HLW with p-Isononylcalix[6]arene-based Extractant. *Radiochemistry*, 2024, vol. 66, no. 2, pp. 163–177. DOI: 10.1134/S106636222402005X.
11. NP-019-2015. *Sbor, pererabotka, khraneniye i konditsionirovaniye zhidkikh radioaktivnykh otkhodov. Trebovaniya bezopasnosti* [Collection, processing, storage and conditioning of liquid radioactive waste. Safety requirements]. Approved by Rostekhnadzor's Order of July 27, 2015 No. 242.
12. Orlova V. A., Kozlov P. V., Dzhevello K. A. et al. Fazoobrazovaniye v slozhnykh sistemakh fosfatnykh i borofosfatnykh stekol, soderzhashchikh zhelezo, khrom, nikel' i seru [Phase Formation in Phosphate and Borophosphate Glasses Containing Iron, Chromium, Nickel, and Sulfur]. *Neorganicheskiye materialy — Inorganic materials*, 2019, vol. 55, no. 8, pp. 890–897. DOI: 10.1134/S0002337X19080116.
13. Remizov M. B., Kazadaev A. A., Kozlov P. V. et al. Korroziionnyye ispytaniya plavlenolitykh ogneupornykh materialov v rasplavakh alyumofosfatnykh stekol [Corrosion tests of fused cast refractory materials in molten aluminophosphate glasses]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika — Refractories and industrial ceramics*, 2015, no. 6, pp. 3–8.
14. Remizov M. B., Kozlov P. V., Kazadayev A. A. et al. Korroziionnyye ispytaniya baddeleitokorundovykh i khromsoderzhashchikh ogneupornykh materialov v rasplavakh alyumofosfatnykh stekol [Corrosion tests of baddeleyite-corundum and chrome refractory materials in aluminophosphate glass melts]. *Vo prosy radiatsionnoy bezopasnosti — Radiation safety issues*, 2017, no. 3, pp. 3–12.

## Information about the authors

*Kozlov Pavel Vasilyevich*, PhD, Associate Professor, Head of the Research Laboratory for Handling and Conditioning of Radioactive Waste of the Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: kozlov\_pavel@inbox.ru.

*Shaidullin Sergey Minulloovich*, Leading Engineer-technologist of the laboratory for the treatment and conditioning of RAO of the Central Plant Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: shaidullinsergey@gmail.com.

*Markova Daria Vladimirovna*, Process Engineer, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: cpl@po-mayak.ru, e-mail: dvmarkova@mail.ru.

*Logunov Mikhail Vasilyevich*, PhD, Advisor to the General Director, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: mvlogunov@po-mayak.ru.

*Remizov Mikhail Borisovich*, PhD, Leading Engineer-technologist, Central Factory Laboratory, FSUE "PA "Mayak" (18, Ermolaeva st., Ozersk, Chelyabinsk region, 456780, Russia), e-mail: mirem@yandex.ru.

*Lukin Sergey Alexandrovich*, Acting Head of the Central Plant Laboratory for Science and Technology, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: lukin235@yandex.ru.

*Zubrilovsky Evgeny Nikolaevich*, Deputy Director of radiochemical plant for the treatment of raw materials – head of the cementing section of liquid and heterogeneous CAO, FSUE "PA "Mayak" (31, Lenin Ave., Ozersk, Chelyabinsk region, 456784, Russia), e-mail: zubrilov2007@yandex.ru.

## Bibliographic description

Kozlov P. V., Shaidullin S. M., Markova D. V., Logunov M. V., Remizov M. B., Lukin S. A., Zubrilovsky E. N. Comprehensive flowchart proposed to process the solution and the sediment parts of the accumulated HLW inventory of complex chemical composition from PA Mayak's radiochemical production facilities. *Radioactive Waste*, 2024, no. 4 (29), pp. 6–15. DOI: 10.25283/2587-9707-2024-4-6-15. (In Russian).